

УДК 55.509.52

Тестирование комплексного метода прогноза молниевой активности

И.М. Губенко¹, К.Г. Рубинштейн^{1, 2*}

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52

²Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

Поступила в редакцию 9.07.2020 г.

Представлены первые результаты прогнозов молниевой активности с помощью комплексного метода для Московского региона в период 1 июня – 31 августа 2017 г. Приводится сравнение успешности прогноза по индексам неустойчивости атмосферы (Total Totals, SWEAT, CAPE, Pw, K и индекс Пескова) и двум моделям электризации конвективных облаков, где в качестве входных данных использовались прогнозы модели WRF-ARW. В качестве эталона для валидации прогнозов взяты данные сети грозопеленгации Worldwide Lightning Location Network. Ее точность предварительно оценена путем сравнения с информацией метеорологических станций.

Ключевые слова: прогноз гроз, Московский регион, WRF-ARW, конвекция, модель электризации, индексы неустойчивости; thunderstorms, Moscow region, WRF-ARW, convection, electrification models, instability indices.

Введение

Грозы – опасные метеорологические явления, которые могут нарушать работу производственных объектов, прежде всего, связанных с энергетикой и электросетями, а также представляют собой угрозу жизни и здоровью населения. Они часто являются причинами лесных и промышленных пожаров. Следовательно, надежный и своевременный прогноз гроз востребован и актуален.

До недавнего времени прогноз гроз проводился исключительно косвенно, по индексам неустойчивости атмосферы, которая в совокупности с интенсивной конвекцией сопровождает грозы. Были предложены десятки различных индексов неустойчивости атмосферы. Известен ряд работ по сравнению их информативности (см., например, [1]). Тем не менее нет индекса, обеспечивающего надежный прогноз гроз и интенсивной конвекции во всех атмосферных ситуациях.

Последние годы появляется все больше работ [2–7], описывающих электризацию конвективных облаков и прямой прогноз гроз с учетом процессов генерации и разделения заряда в облаке. К сожалению, подобные методы также не обеспечивают требуемой точности прогноза. Это связано с недос-

татком знаний об атмосферном электричестве и с отсутствием регулярных измерений его характеристик (пунктов измерения крайне мало, проводятся они нерегулярно).

В рамках настоящей работы на сравнительно большом интервале (лето 2017 г.) для Московского региона было сделано следующее:

1) оценена эффективность индексов неустойчивости атмосферы для прогноза гроз по нашим предварительным результатам, изложенным в [1];

2) оценены разработанная нами ранее модель электризации конвективных облаков (EL), а также близкая по идеологии модель электризации облаков WRF-ELEC;

3) проведена оценка точности данных сети Worldwide Lightning Location Network (WWLLN), использованной в качестве эталона;

4) проведены оценки первых экспериментальных исследований комплексного метода прогноза гроз с помощью индексов неустойчивости атмосферы и модели электризации конвективных облаков.

Индексы неустойчивости атмосферы и модели электризации конвективных облаков

Для сравнения были выбраны индексы неустойчивости, которые применялись в прогнозах гроз, показавших наибольшую оправдываемость согласно [1].

* Инна Михайловна Губенко (img0504@yandex.ru); Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com).

Приведем их краткое описание в соответствии с [8–14].

1. В индексе Total Totals (TT) используются разности температуры средней и нижней границ конвективного облака, на уровне конденсации принимается во внимание влажность основания облака (формирование *Cb* с учетом Td_{850}):

$$TT = T_{850} - Td_{850} - 2T_{500}, \quad (1)$$

где T_{850} , T_{500} – температура воздуха на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа, °С; Td_{850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °С.

Условно при $TT \geq 44$ °С прогнозируется гроза.

2. В индексе Severe Weather ThrEAT index (SWEAT) учитывается вертикальный сдвиг ветра, т.е. горизонтальное смещение различных частей облака при его эволюции:

$$SWEAT = 12Td_{850} + 20(T_{850} - Td_{850} - 2T_{500} - 49) + 2(v_{850} - v_{500}) + 125(\sin(\alpha_{500} - \alpha_{850}) + 0,2), \quad (2)$$

где v_x – скорость ветра, м/с, на изобарической поверхности x , гПа; α – направление ветра, град.

Условно при $SWEAT \geq 250$ прогнозируется гроза.

3. В расчет Whiting index (K), °С, входит вертикальная разность температур в нижней половине *Cb*, относительная влажность на уровне конденсации, а также испарение *Cb* при вовлечении воздуха в среднюю часть облака, выраженные с учетом дефицита точки росы вне *Cb* на изобарической поверхности 700 гПа (dd_{700} , °С):

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - dd_{700}, \quad (3)$$

При $K \geq 0$ °С прогнозируется гроза.

4. В индексе Convective Available Potential Energy (CAPE), Дж/кг · К, учитывается энергия неустойчивости, т.е. работа, совершаемая силой плавучести при адиабатическом подъеме единичной массы от нижней границы указанного слоя до верхней, и, следовательно, конвективная вертикальная скорость [15]:

$$CAPE = -R \int (T' - T) d(\ln p), \quad (4)$$

где T' – температура частицы облачного воздуха на изобарической поверхности, °С; R – универсальная газовая постоянная сухого воздуха, Дж/кг · К.

При $CAPE \geq 1500$ Дж/кг · К прогнозируется гроза.

5. В индексе неустойчивости Б.Е. Пескова (Pesk) учитываются степень неустойчивости в середине конвективного облака, а также относительная влажность, вертикальный сдвиг ветра и его приземная конвергенция [14]:

$$Pesk = 0,4(T' - T)_{600} - 0,05dd_{500} + 0,4\nabla^2 p_0 - 0,07|\Delta v|_{700}^{300}, \quad (5)$$

где T – температура воздуха на изобарической поверхности 600 гПа, °С; $\nabla^2 p_0$ – лапласиан приземного давления, рассчитываемый по восьми точкам, удаленным от центральной точки на 250 км; $|\Delta v|_{700}^{300}$ – модуль векторной разности скорости ветра, м/с, на поверхностях 300 и 700 гПа. Индекс безразмерный, так как расчетная формула включает обезразмеривающие константы.

При положительных значениях индекса в ближней зоне (~ 10 км) прогнозируется гроза [14].

6. Индекс неустойчивости атмосферы с учетом вертикальной составляющей вектора скорости ветра Instability index based on vertical wind component (Iiw). Индекс построен на анализе параметров атмосферы, характерных для возникновения и эволюции кучево-дождевого грозового облака. Важное отличие этого индекса от предыдущих в том, что учитывается вертикальная скорость w конвективного происхождения. Например, в [4, 16–18] упоминается о связи молниевой активности с вертикальным потоком гидрометеоров в твердой фазе (снежинки, льдинки, ледяная крупа). В [19] показано, что чаще всего увеличение числа грозовых облаков отмечается при средней вертикальной составляющей вектора скорости, равной 0,1 м/с. Это объясняется тем, что наряду со значениями скорости вертикальных потоков $w > 0$ всегда имеются участки облака, где воздух опускается (часто вблизи боковых границ облака). Нисходящие движения в этом случае имеют компенсационное происхождение [20].

Важно отметить, что осреднение w в моделях обычно выполняется по ячейке сетки с размерами сторон порядка единиц или десятков километров [19, 21]. Что касается причин образования восходящих потоков, согласно результатам теоретических оценок [22] они главным образом определяются количеством скрытого тепла, которое выделяется при конденсации водяного пара. Последнее же увеличивается с ростом температуры и влажности около основания облака, которое может располагаться вблизи изобарической поверхности 850 гПа. Поэтому чем выше температура и точка росы в этом слое, тем более мощные восходящие потоки могут образоваться в облаках.

Согласно [22] пороговые значения температуры воздуха и температуры точки росы подоблачного слоя, характерные для начала молниевой активности, составляют 7 °С. Это значение типично для весенне-летнего конвективного сезона в ЦФО. В [23] отмечено, что в этот сезон над европейской территорией России мощность *Cb* чаще всего достигает изобарической поверхности ~ 300 гПа. Константы для безразмерных величин получены как обратные величины суммы вертикальных составляющих вектора скорости, температуры и температуры точки росы, характерные для инициирования молнии [14].

Расчетная формула:

$$\Pi_w = 10 \sum_{300}^{850} \omega + 0,125 [T_{850} + 0,5(Td_{850} + Td_2)], \quad (6)$$

где $\sum_{300}^{850} \omega$ — сумма вертикальных составляющих вектора скорости на изобарических поверхностях 300, 500, 600, 700, 850 гПа, м/с; Td_2 — температура точки росы на высоте 2 м, °С.

При $\Pi_w \geq 3$ прогнозируется гроза.

Как уже говорилось выше, вторую группу методов прогноза гроз составляют модели электризации, явно учитывающие процессы формирования и разделения заряда в конвективных облаках. В настоящей работе сравниваются оценки двух моделей.

Модель электризации конвективных облаков, обозначенная как EL, разработана и испытана авторами настоящей статьи ранее [2, 5–7]. Она представляет собой решение уравнений, описывающих процесс электризации в кучево-дождевых облаках. Входными данными модели являются вертикальные профили метеорологических величин (температура; содержание водяного пара, граупелей, ледяных и снежных частиц; вертикальная скорость). Модель включает в себя решение уравнения напряженности электрического поля, уравнения Пуассона, уравнения плотности объемного заряда [5, 6]. Пробойное значение напряженности, достаточное для инициации молнии, было принято $2,2 \cdot 10^5$ В/м на основе рекомендаций [6].

Вторая оцениваемая модель — WRF-ELEC [6] — описывает схему разряда в конвективных облаках. По своей постановке она близка модели EL, но требует при использовании конкретную параметризацию микрофизики облаков — NSSL 2-moment, которая имеется в библиотеке модели WRF-ARW [7].

Далее эта модель обозначена ELEC. Модель EL формально более универсальна.

В качестве входных данных для прогноза гроз в настоящей работе взяты численные прогнозы модели WRF-ARW v.3.9.1.1. Оцениваемая территория — Московский регион (54,83–56,33° с.ш.; 35,96–40,01° в.д.); период — 00:00 UTC 1 июня 2017 г. — 23:00 UTC 31 августа 2017 г. (рис. 1). Пространственное разрешение в расчетах — 18 км, количество уровней по вертикали — 39. В качестве начальных и краевых условий мы взяли данные GFS (Global Forecast System). Использованы параметризации:

- конвекции — Kain–Fritsch [24],
- микрофизики облаков — NSSL 2-moment Scheme with CCN Prediction [25],
- радиации — RRTMG Shortwave and Longwave Schemes [26, 27],
- процессов в почве — Unified NOAA Land Surface Model [28],
- планетарного пограничного слоя — Bougeault–LaCarrere Scheme (BouLac) [29].

Оценки прогнозов гроз рассчитаны за каждые 6 ч в интервале 0–48 ч и включают в себя вычисления общей оправдываемости (U , %), оправдываемости и предупрежденности наличия ($U_{гр}$ и $P_{гр}$, %) и отсутствия гроз ($U_{6-гр}$ и $P_{6-гр}$, %), ложные тревоги (FA, %), пропуск явления (ME, %), а также критерий Пирса–Обухова (Pirci, ed.) [30].

Оценка точности сети WWLLN

В качестве эталона при оценках качества прогноза гроз использовались данные сети грозопеленгации WWLLN [31]. Предварительно мы сравнили показания WWLLN с информацией, передаваемой с метеорологических станций (табл. 1).

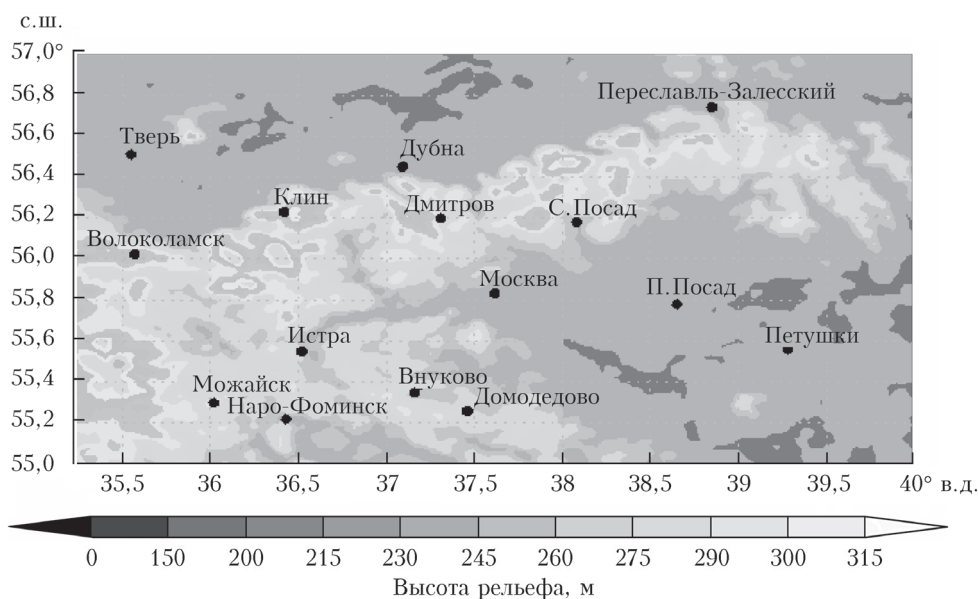


Рис. 1. Карта расчетной области

Таблица 1
Оценки точности сети WWLLN

Характеристика	Радиус, км	
	15	25
Число гроз по WWLLN, подтвержденных метеостанциями	359	378
не подтвержденных метеостанциями	49	30
Общее число гроз по WWLLN	408	
Достоверность	88%	93%
Вероятность ложного диагноза	12%	7%

Всего по сети WWLLN за лето 2017 г. на территории ЦФО отмечено 408 молниевых разрядов.

Достоверность сети WWLLN рассчитывается как отношение числа случаев гроз по данным WWLLN, совпавших со случаями гроз по данным синоптических станций (n_1), к общему числу гроз по WWLLN (N) [32]:

$$A = \frac{n_1}{N} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Вероятность ложного диагноза сети WWLLN – отношение числа случаев гроз по данным WWLLN,

не совпавших со случаями гроз по данным синоптических станций (n_2), к общему числу гроз по WWLLN [32]:

$$F = \frac{n_2}{N} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Из анализа показателей табл. 1 следует, что данные рассматриваемой сети обладают высокой достоверностью и, следовательно, могут использоваться для валидации прогнозов гроз.

Оценки прогноза гроз

В табл. 2 приведены результаты оценок качества прогноза гроз (полужирным выделены лучшие оценки); характеристики оценок рассчитаны по [30].

Как видно из табл. 2, общая оправдываемость мало меняется при прогнозах гроз до 48 ч с помощью различных индексов (от 75 до 83%) и несколько снижается с увеличением заблаговременности. Оправдываемость прогноза наличия гроз приблизительно одинакова при расчетах с разными индексами и моделями, она не зависит от заблаговременности. Для всех сроков и индексов она близка

Таблица 2
Оценки прогноза гроз по Московскому региону за конвективный сезон 2017 г.

Характеристика	TT	Иw	K	SWEAT	Pesk	CAPE	EL	WRF-ELEC
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Заблаговременность прогноза 6 ч</i>								
<i>U</i> , %	85	86	81	82	81	84	86	86
<i>U</i> _{гр} , %	66	59	49	51	49	58	57	57
<i>P</i> _{гр} , %	40	73	93	51	94	52	92	92
<i>U</i> _{б_гр} , %	95	89	78	80	78	91	84	85
<i>P</i> _{б_гр} , %	88	94	98	97	98	89	98	97
FA, %	34	41	51	49	51	42	43	43
ME, %	60	27	7	49	6	48	8	8
Pirci, ед.	0,53	0,53	0,47	0,48	0,48	0,47	0,55	0,56
<i>Заблаговременность прогноза 12 ч</i>								
<i>U</i> , %	84	85	79	82	81	85	85	85
<i>U</i> _{гр} , %	62	57	47	50	48	60	56	55
<i>P</i> _{гр} , %	38	67	89	50	91	54	90	88
<i>U</i> _{б_гр} , %	95	89	77	80	78	92	84	85
<i>P</i> _{б_гр} , %	87	92	97	96	97	90	97	94
FA, %	38	43	53	50	52	40	44	45
ME, %	62	33	11	50	9	46	10	12
Pirci, ед.	0,49	0,49	0,44	0,46	0,46	0,49	0,54	0,54
<i>Заблаговременность прогноза 18 ч</i>								
<i>U</i> , %	84	84	77	80	80	85	84	85
<i>U</i> _{гр} , %	59	55	43	47	48	55	55	55
<i>P</i> _{гр} , %	36	62	82	47	89	50	86	87
<i>U</i> _{б_гр} , %	94	89	76	80	78	92	84	84
<i>P</i> _{б_гр} , %	87	91	95	94	97	90	96	97
FA, %	41	45	57	53	52	45	45	45
ME, %	64	38	18	53	11	50	14	13
Pirci, ед.	0,46	0,46	0,38	0,40	0,45	0,45	0,51	0,52

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Заблаговременность прогноза 18 ч</i>								
U , %	84	84	77	80	80	85	84	85
$U_{гр}$, %	59	55	43	47	48	55	55	55
$P_{гр}$, %	36	62	82	47	89	50	86	87
$U_{6_{гр}}$, %	94	89	76	80	78	92	84	84
$P_{6_{гр}}$, %	87	91	95	94	97	90	96	97
FA, %	41	45	57	53	52	45	45	45
ME, %	64	38	18	53	11	50	14	13
Pirici, ед.	0,46	0,46	0,38	0,40	0,45	0,45	0,51	0,52
<i>Заблаговременность прогноза 24 ч</i>								
U , %	83	83	75	79	79	82	84	84
$U_{гр}$, %	57	54	41	46	47	52	54	54
$P_{гр}$, %	35	59	78	46	84	47	82	83
$U_{6_{гр}}$, %	94	89	75	80	78	90	84	84
$P_{6_{гр}}$, %	87	90	94	93	96	88	95	95
FA, %	43	46	59	54	53	48	46	46
ME, %	65	41	22	54	16	53	18	17
Pirici, ед.	0,43	0,44	0,35	0,39	0,42	0,41	0,49	0,50
<i>Заблаговременность прогноза 48 ч</i>								
U , %	82	83	74	79	78	82	83	83
$U_{гр}$, %	53	53	39	45	45	50	53	53
$P_{гр}$, %	33	56	73	45	79	45	78	79
$U_{6_{гр}}$, %	93	89	74	80	78	90	84	84
$P_{6_{гр}}$, %	86	90	92	93	94	88	95	95
FA, %	47	47	61	55	55	50	47	47
ME, %	67	44	27	55	21	55	22	22
Pirici, ед.	0,39	0,42	0,31	0,38	0,39	0,38	0,47	0,48

к 50–55%. Наилучшая оправдываемость наличия гроз у прогноза с помощью индекса ТТ и модели EL (чуть больше 50%). Наибольшее значение предупрежденности наличия гроз дает индекс ТТ. Оправдываемость и предупрежденность прогноза отсутствия гроз по всем испытываемым методикам вполне успешны и составляют более 75 и 86% соответственно. К сожалению, в прогнозах с помощью ТТ и EL больше всего ложных тревог – порядка 40%. Пропусков прогноза гроз в целом не очень много (их заметно больше у индекса ТТ (60%) и меньше у модели EL (порядка 40%)). Коэффициент Пирси – лучший в прогнозах по модели EL (порядка 0,5). Оценки прогноза гроз моделью электризации EL близки по успешности модели ELEC. Ложные тревоги равны, за исключением прогноза с заблаговременностью 12 и 24 ч: в обоих случаях в прогнозах с помощью EL ложных тревог меньше на 1%, чем с помощью ELEC.

В связи с недостаточно высокими значениями оправдываемости и коэффициента Пирси была предпринята попытка улучшить прогноз гроз, создав комплексный метод. Суть этого подхода заключается в объединении прогноза гроз с помощью лучших индексов неустойчивости атмосферы и модели электризации.

Описание комплексного метода прогноза гроз

Так как, на наш взгляд, явный учет электрических процессов в атмосфере – наиболее перспективный путь совершенствования методов прогноза гроз, в дальнейшем мы планируем развитие и улучшение модели электризации конвективной облачности. На нынешнем этапе было важно понять причины пропусков целей и ложных тревог в прогнозах моделью EL (табл. 3). Пропуски могли возникать из-за того, что в ряде точек, где наблюдалась гроза, в прогнозах модели WRF-ARW недостаточно корректно рассчитывались концентрации гидрометеоров и, в частности, значения капельной влаги. Следовательно, в таких случаях были получены низкие объемные электрические заряды и напряженность в конвективных облаках, недостаточная для развития интенсивных вертикальных движений и возможного грозового пробыя.

В тех случаях, когда в прогнозах по EL отмечается пропуск, с помощью индексов неустойчивости возможно прогнозировать наличие гроз. Например, при заблаговременности 48 ч из 86 пропусков гроз моделью, использующей индексы неустойчивости

Таблица 3

Количество молниевых очагов с применением индексов при пропусках цели моделью электризации

Заблаговременность, ч	Количество пропусков цели моделью электризации, ед.	Количество молниевых очагов, ед.					
		TT	Иw	WHITING	SWEAT	Pesk	CAPE
6	14	5	4	2	3	5	5
12	21	9	9	5	7	7	8
18	57	23	24	19	25	29	24
24	70	31	35	22	26	26	27
48	86	43	44	32	37	35	36

было спрогнозировано от 36 до 43 случаев (табл. 3). Возможны, конечно, и обратные примеры.

Таким образом, суть предлагаемой в настоящей статье методики в следующем: в тех точках, где наблюдались низкие концентрации приземных гидрометеоров и мог возникнуть пропуск прогноза гроз по модели EL, прогноз был дополнен прогнозом с применением индексов неустойчивости.

Из рис. 2 видно, что качество прогноза пространственной локализации грозовых очагов в таких случаях заметно улучшается.

В табл. 4 приводятся оценки качества прогноза по комплексному методу – комбинации модели электризации облаков с каждым из индексов. Полу жирным выделены наилучшие характеристики прогноза. В целом оценки качества по предлагаемой мето-

дике несколько выше предыдущих, а также полученных только по модели электризации и ELEC. Как видно из таблицы, общая оправдываемость по-прежнему мало меняется для прогнозов гроз с помощью различных индексов, применяемых в комплексе с EL: незначительно уменьшается с увеличением периода заблаговременности (от 95 до 85%). При этом ее значения по предложенной методике несколько выше, чем только по моделям EL и ELEC (85–95% против 83–86%). Например, общая оправдываемость по предложенной методике в прогнозах с заблаговременностью 6 и 12 ч выше, чем по моделям EL и ELEC (95 и 91% против 85 и 86% соответственно).

В целом работ по оценке прогноза гроз по различным индексам неустойчивости сравнительно немного. В частности, в [33] приводятся результаты общей оправдываемости прогноза гроз по индексам K, TT и SWEAT для конвективных сезонов 2005–2018 гг., рассчитанных в аэропорту Гейдар Алиев (г. Баку, Азербайджан). Общая оправдываемость составляла 36,4, 54,5 и 94,1% соответственно. Для всех сроков по предложенной комплексной методике она колеблется от 55 до 58%. Оправдываемость наличия гроз по моделям EL и ELEC несколько ниже и составляет 53–56%. Предупрежденность наличия гроз выше при использовании для прогнозов индекса Иw с моделью EL. Оправдываемость отсутствия гроз для комплексного подхода, полученная всеми способами, успешна и составляет 84–95%, в том числе для методик «индекс + модель». То же самое можно сказать о предупрежденности

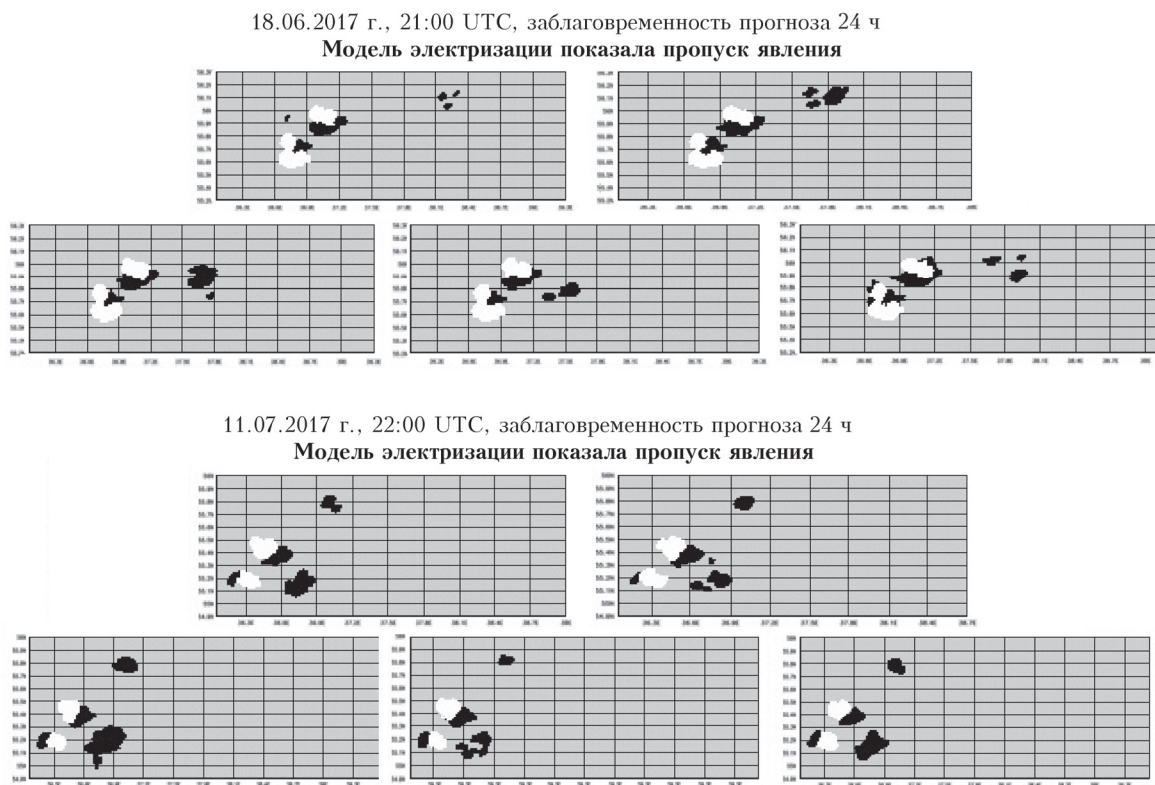
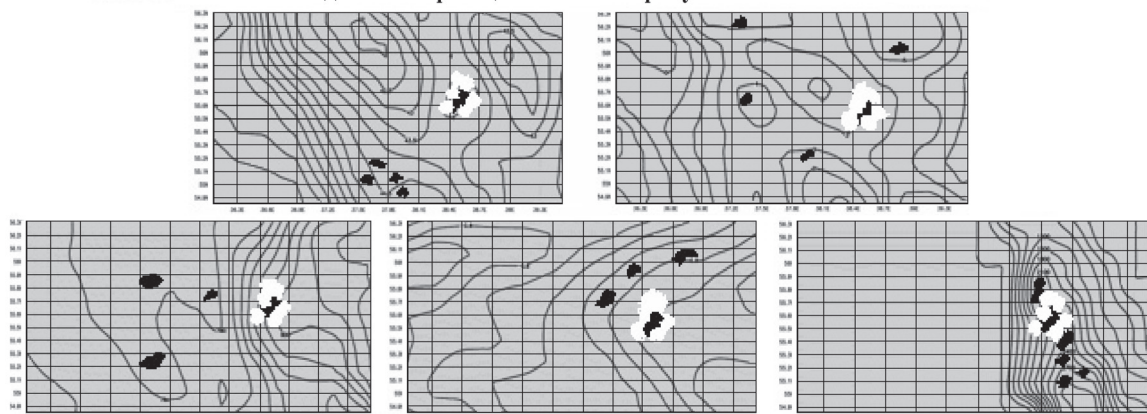
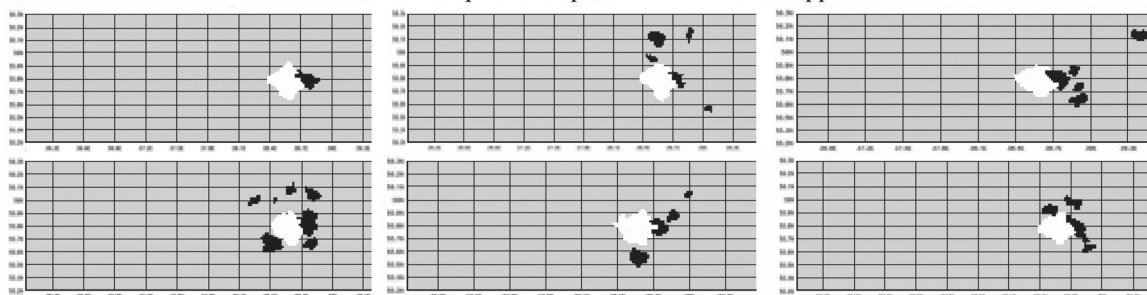


Рис. 2. Примеры карт прогнозов «индекс + модель»: серый цвет – отсутствие прогноза гроз с помощью «индекс + модель», черный – их наличие, белый – наблюдаемый грозовой очаг по WWLLN

1.08.2017 г., 12:00 UTC, заблаговременность прогноза 12 ч
 Модель электризации показала пропуск явления



10.08.2017 г., 12:00 UTC, заблаговременность прогноза 12 ч
 Модель электризации предсказала молнии корректно



Окончание рис. 2

Таблица 4

Оценки прогноза гроз по предложенной методике и модели WRF-ELEC в Московском регионе
 за конвективный сезон 2017 г.

Характеристика	TT + EL	Иw + EL	K + EL	SWEAT + EL	Pesk + EL	CAPE + EL	EL	WRF-ELEC
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Заблаговременность прогноза 6 ч</i>								
$U, \%$	95	95	95	95	95	95	86	86
$U_{гр}, \%$	57	57	57	57	57	57	57	57
$P_p, \%$	90	93	91	92	93	93	92	92
$U_{6-гр}, \%$	95	95	95	95	95	95	84	85
$P_{6-гр}, \%$	99	99	99	99	99	99	98	97
FA, %	42	43	43	43	43	43	43	43
ME, %	7	7	9	8	7	7	8	8
Pirci, ед.	0,56	0,56	0,56	0,56	0,57	0,57	0,55	0,56
<i>Заблаговременность прогноза 12 ч</i>								
$U, \%$	91	91	91	91	91	91	85	85
$U_{гр}, \%$	58	58	57	58	58	58	56	55
$P_{гр}, \%$	95	95	94	95	95	95	90	88
$U_{6-гр}, \%$	91	91	91	91	91	91	84	85
$P_{6-гр}, \%$	99	99	99	99	99	99	97	94
FA, %	42	42	43	42	42	42	44	45
ME, %	5	5	6	5	5	5	10	12
Pirci, ед.	0,56	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,54	0,54

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Заблаговременность прогноза 18 ч</i>								
<i>U</i> , %	86	85	85	86	86	86	84	85
<i>U</i> _{гр} , %	57	56	56	57	57	57	55	55
<i>P</i> _{гр} , %	92	91	91	92	93	92	86	87
<i>U</i> _{б_гр} , %	84	84	84	84	84	84	84	84
<i>P</i> _{б_гр} , %	98	98	98	98	98	98	96	97
FA, %	43	44	44	43	43	43	45	45
ME, %	8	9	9	8	7	8	14	13
Pirci, ед.	0,54	0,54	0,54	0,55	0,55	0,54	0,51	0,52
<i>Заблаговременность прогноза 24 ч</i>								
<i>U</i> , %	86	86	85	85	85	85	84	84
<i>U</i> _{гр} , %	56	56	55	55	55	55	54	54
<i>P</i> _{гр} , %	89	90	86	87	87	88	82	83
<i>U</i> _{б_гр} , %	85	85	85	85	85	85	84	84
<i>P</i> _{б_гр} , %	97	97	97	97	97	97	95	95
FA, %	44	44	45	45	45	45	46	46
ME, %	11	10	14	13	13	12	18	17
Pirci, ед.	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,49	0,50
<i>Заблаговременность прогноза 48 ч</i>								
<i>U</i> , %	85	85	84	85	85	85	83	83
<i>U</i> _{гр} , %	54	55	54	54	54	54	53	53
<i>P</i> _{гр} , %	89	89	86	87	87	87	78	79
<i>U</i> _{б_гр} , %	84	84	84	84	84	84	84	84
<i>P</i> _{б_гр} , %	97	97	97	97	97	97	95	95
FA, %	46	45	46	46	46	46	47	47
ME, %	11	11	14	13	13	13	22	22
Pirci, ед.	0,52	0,52	0,50	0,51	0,51	0,51	0,47	0,48

отсутствия гроз. Для комплексного подхода этот показатель вполне успешен и составляет 97–99%, в том числе для методик «индекс + модель». Ранее каждый индекс неустойчивости отдельно обеспечивал предупредительность отсутствия гроз 86–98%. Количество ложных прогнозов гроз варьируется от 42 до 47%, в то время как ранее в прогнозах с помощью отдельных индексов составляло 61%. Количество пропусков гроз при использовании прогноза с помощью индексов неустойчивости достигало 65%. Комплексный подход позволяет снизить эти показатели до 5–14%. Для моделей EL и ELEC эти цифры варьируются от 8 до 22%. Коэффициент Пирси–Обухова также улучшился в прогнозе комплексным методом: в частности, для заблаговременности менее 24 ч при прогнозе комплексным методом коэффициент составляет 0,54–0,57. При расчетах с помощью индексов неустойчивости он равен 0,38–0,53; для прогнозов с помощью моделей EL и ELEC – не превышает 0,56. Для прогнозов с заблаговременностью 24–48 ч коэффициент Пирси–Обухова при применении комплексного подхода варьируется от 0,50 до 0,53, с использованием индексов – 0,31–0,44, для моделей EL и ELEC не превышает 0,50.

Заключение

Проведена предварительная оценка точности сети WWLLN в сравнении с данными метеорологиче-

ских станций. Показано, что данные обладают весьма высокой достоверностью и, следовательно, применимы для оценок прогнозов гроз.

Получены оценки прогноза гроз по двум моделям электризации конвективных облаков, а также по нескольким индексам неустойчивости атмосферы. Приведено описание и первые оценки комплексного метода прогноза молниевой активности, заключающегося в объединении прогноза с помощью индексов неустойчивости атмосферы и модели электризации конвективных облаков. Предложенная методика показала улучшение качества прогноза гроз. В частности, комплексный подход позволяет снизить показатель пропуска цели до 5–14%. При прогнозах гроз по индексам неустойчивости атмосферы пропуск цели достигал 68%, по моделям EL и WRF варьировался в пределах 8–22%. Количество ложных тревог приобрело меньший разброс: от 42 до 47%. Значения критерия Пирси–Обухова в зависимости от заблаговременности составляют 0,53–0,57.

В дальнейшем мы планируем совершенствовать модель электризации конвективной облачности и развивать комплексный метод.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № А 19-05-00047 и № мол_а 18-35-00044).

1. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорол. и гидрол. 2015. № 1. С. 27–37.

2. Губенко И.М. Исследование физических процессов в конвективных облаках во время гроз на основе численного моделирования: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Гидрометцентр РФ, 2016. 26 с.
3. Довгало Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. СПб.: Моби Дик, 2013. 220 с.
4. Дементьева С.О., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Расчет электрического поля и индекса грозовой активности в моделях прогноза погоды // Изв. Физ. РАН. Физика атмосф. и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 210–217.
5. Ziegler C.D., MacGorman J.D., Ray P. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrization of a mountain thunderstorm // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, N D7. P. 12833–12855.
6. Mansel E.R., MacGorman D.R., Ziegler C.L., Straka J. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. 12–20.
7. Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67, N 1. P. 171–194.
8. Miller R.C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Report 200(R). 1972. P. 190.
9. George J.J. Weather forecasting for aeronautics. New York, London: Academic Press, 1960. 673 p.
10. Richter H. The severe thunderstorm forecast and warning process in Australia // Proc. B. Meteor. Training centre Melb. 2008. P. 4–11.
11. SPC Mesoscale Analysis Pages [Electronic resource]. URL: <http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/> (last access: 11.01.2020).
12. Charba J.P. Operational system for predicting thunderstorms two to six hours in advance // NOAA Techn. Memo. NWS TDL. 1977. V. 64. 24 p.
13. Haklander A.J., Delden A.V. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands // Atmos. Res. 2003. V. 67–68. P. 273–299.
14. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть II. Обработка материалов метеорологических наблюдений. М.: Гидрометеоиздат, 1965. 14 с.
15. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 752 с.
16. Petersen W.A., Rutledge S.A. On the relationship between cloud to ground lightning and convective rainfall // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N D12. P. 14025–14040.
17. Cecil D.J., Goodman S.J., Voccippio D.J. Three years of TRMM precipitation features. Pt I: Radar, radiometric, and lightning characteristics // Month. Weath. Rev. 2005. V. 133, N 3. P. 543–566.
18. Petersen W.A., Christian H.J., Rutledge S.A. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32, N 14. P. 4.
19. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 232 с.
20. Fujita T., Arnold D. Development of a cumulonimbus under the influence of strong vertical shear // Proc. Tenth Weath. Radar Conf. Boston. Am. Meteorol. Soc. 1963. P. 178–186.
21. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 352 с.
22. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозное электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. 403 с.
23. Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 648 с.
24. Kain J.S. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update // J. Appl. Meteorol. 2004. V. 43, N 1. P. 170–181.
25. Lim K.-S. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models // Mon. Weather Rev. 2010. V. 138, N 5. P. 1587–1612.
26. Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46. P. 3077–3107.
27. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N D14. P. 16663–16682.
28. Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., Tarpley J.D. Implementation of NOAA land surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N 22. P. 8851.
29. Janjic Z.I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes // Mon. Weather Rev. 1994. V. 122. P. 927–945.
30. РД 52.27.284-91. Руководящий документ. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. Москва: Комитет Гидрометеорологии при Кабинете Министров СССР, 1991. 149 с.
31. Lay E.H. Investigating lightning-to-ionosphere energy coupling based on VLF lightning propagation characterization: PhD Thesis. Seattle, Washington State, USA: University of Washington, 2008. 26 p.
32. Горбатовская А.С., Дорофеев Е.В., Попов И.Б., Тарабукин И.А. Опытная эксплуатация образца ДМРЛ-С на позиции Валдай и анализ результатов количественной статистической оценки оправдываемости распознавания гроз на основе сопоставления с данными наземной наблюдательной сети и спутниковой информацией // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. 2012. Вып. 565. С. 232–245.
33. Гусейнов Н.Ш., Агаева А.А. Применение индексов неустойчивости атмосферы к оперативному прогнозированию грозы на основе модельных данных // Уч. запiski РГГМУ. 2019. № 56. С. 30–37.

I.M. Gubenko, K.G. Rubinstein. Analysis of comprehensive forecast of lightning activity.

Results of lightning activity forecast over the territory of the Moscow region for the period June 1 – August 31, 2017, are presented. The validation is made for forecasts based on the atmospheric instability indices, Cb electrification model, and WRF-ELEC module. The predictions of WRF-ARW model are used as input data. The indices Total Totals, SWEAT, CAPE, Iww, K (Whiting), and Peskov are studied. Estimation is performed using the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN). The WWLLN data are preliminary compared with meteorological data.